

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

GABRIEL OTAVIO FIGUEIREDO BOARETTO

ESTUDO COMPARATIVO DA SUBSTITUIÇÃO GRADATIVA DE AGREGADO  
GRAÚDO NA FORMA LAMELAR PELA FORMA CÚBICA NAS PROPRIEDADES  
DO CONCRETO

Joinville

2017

GABRIEL OTAVIO FIGUEIREDO BOARETTO

ESTUDO COMPARATIVO DA SUBSTITUIÇÃO GRADATIVA DE AGREGADO  
GRAÚDO NA FORMA LAMELAR PELA FORMA CÚBICA NAS PROPRIEDADES  
DO CONCRETO

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de bacharel em  
Engenharia de Infraestrutura na  
Universidade Federal de Santa Catarina,  
Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Ma. Valéria Bennack.

Coorientador: Prof. Dr. Luciano Senff.

Joinville

2017

ESTUDO COMPARATIVO DA SUBSTITUIÇÃO GRADATIVA DE AGREGADO  
GRAÚDO NA FORMA LAMELAR PELA FORMA CÚBICA NAS PROPRIEDADES  
DO CONCRETO

GABRIEL OTAVIO FIGUEIREDO BOARETTO

Esta Monografia foi julgada e aprovada  
como requisito parcial para obtenção do  
título de Engenheiro de Infraestrutura na  
Universidade Federal de Santa Catarina,  
Centro de Joinville.

Joinville (SC),

Banca Examinadora:

---

Profa. Valéria Bennack, Ma. Eng.  
Orientadora

---

Profa. Carine Cardoso dos Santos, Dra. Eng.  
Membro

---

Profa. Paula Manica Lazzari, Dra, Eng.  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço acima de tudo aos meus pais, Claudir Jose Boaretto e Nadir Figueiredo Boaretto. O apoio incondicional, a dedicação à família e o exemplo de caráter foram, e continuarão sempre sendo, essenciais para chegar até aqui.

À Odin, Pai de Todos, detentor de toda a sabedoria.

Às empresas Mineração Trevo e Mineração Concreto, empresas onde a ideia deste trabalho surgiu, pelo fornecimento do espaço e materiais necessários para sua realização e pela oportunidade de realizar meu primeiro estágio.

À concreteira Supermix, que possibilitou a realização de meu estágio obrigatório e onde aprendi muito sobre o tema aqui abordado.

À Professora Mra. Valéria Bennack e ao Professor Dr. Luciano Senff, por todo o auxílio prestado ao longo deste trabalho.

Ao amigo Ademar Anselmo Kehl Filho, pela ajuda em vários momentos ao longo do trabalho.

Ao amigo Gustavo Rafael Miranda, por passar um longo domingo auxiliando no rompimento de corpos de prova e me ouvindo falar sobre concreto.

À amiga Debora Rafaela Favetti, por ter me suportado nos vários momentos de estresse no decorrer deste longo ano.

Aos companheiros da Associação Atlética Acadêmica do Centro de Engenharias da Mobilidade, que trabalharam para compensar minha ausência nos momentos que tive que deixá-los de lado por conta deste trabalho.

A todos aqueles que ajudaram a tornar todos esses anos de graduação únicos e inesquecíveis.

## RESUMO

Mesmo sendo um material utilizado a milhares de anos, o concreto vem sendo constantemente estudado, visando cada vez mais melhorar suas propriedades e reduzir seu custo. Uma forma eficiente de se fazer isto é melhorando as características de seus agregados, que compõem a maior parte do volume do concreto. Neste trabalho, a análise foi realizada no agregado graúdo, mais especificamente na brita 1. Esta brita de forma lamelar foi beneficiada de modo a reduzir seu índice de forma e com este material foram produzidos concretos para dois traços de diferentes resistências. Para cada traço foi feita a substituição da brita de forma lamelar pela brita beneficiada em 0%, 50% e em 100%. Os resultados mostraram que há um incremento de resistência progressivo conforme o aumento da substituição. Este ganho no traço de Fck 15 MPa foi de 27,53% para 50% de substituição e 55,27 % para 100 %. O traço de Fck 35 MPa apresentou, respectivamente, 7,09 % e 10,69 % para 50 % e 100 % de substituição.

**Palavras-chave:** Índice de forma. Forma do agregado. Agregado lamelar. Agregado graúdo. Concreto.

## **ABSTRACT**

Although it has been used for thousands of years, concrete has been constantly being studied, aiming to improve its properties and reduce its cost. An efficient way to do this is to improve the characteristics of your aggregates, which make up most of the volume of concrete. In this work, the analysis was performed in the aggregate, more specifically in crushed stone 1. This lamellar crushed stone was beneficiated in order to reduce its shape factor and with this material were produced concrete for two traces of different resistances. For each trace the substitution of the crushed stone was carried out by 0%, 50% and 100%. The results showed that there is an progressive increase of resistance as the substitution increases. This gain in the trace of Fck 15 MPa was 27.53% for 50% substitution and 55.27% for 100%. The Fck trace 35 MPa presented, respectively, 7.09% and 10.69% for 50% and 100% substitution.

**Keywords:** Shape factor. Aggregate shape. Lamellar aggregate. Coarse aggregate. Concrete

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Possibilidade de uso do concreto. ....	15
Figura 2: Britador de mandíbulas de 1 eixo. ....	20
Figura 3: Britador de mandíbulas de 2 eixos. ....	21
Figura 4: Vista em corte de britador de cone. ....	21
Figura 5: Vista em corte de britador VSI. ....	22
Figura 6: Brita 1 cúbica x lamelar. ....	26
Figura 7: Separador mecânico utilizado ....	29
Figura 8: Agregados. ....	29
Figura 9: Séries de Peneiras. ....	30
Figura 10: Frasco Chapman vazio e com areias. ....	31
Figura 11: Materiais utilizados no ensaio. ....	32
Figura 12: Areia natural e areia artificial sendo ensaiadas. ....	32
Figura 13: Corpos de prova retificados e preparados para o rompimento. ....	33
Figura 14: Prensa hidráulica utilizada na ruptura do concreto. ....	34
Figura 15: Amostras para ensaio de índices físicos do concreto. ....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Traços fornecidos pela empresa.....	27
Tabela 2: Formulações utilizadas no trabalho.....	28
Tabela 3: Massa específica das areias. ....	42
Tabela 4: Massa específica seca do agregado graúdo. ....	42
Tabela 5: Massa específica aparente do agregado graúdo.....	42
Tabela 6: Absorção de água dos agregados.....	44
Tabela 7: Índice de forma da brita 1. ....	46



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Relação A/C das formulações. ....	28
Gráfico 2: Curva granulométrica da areia natural. ....	37
Gráfico 3: Curva granulométrica da areia artificial. ....	38
Gráfico 4: Curva granulométrica da brita 0. ....	39
Gráfico 5: Curva granulométrica da brita 1 <i>NORMAL</i> . ....	40
Gráfico 6: Curva granulométrica da brita 1 <i>VSI</i> . ....	41
Gráfico 7: Massa específica do concreto. ....	43
Gráfico 8: Massa específica saturada do concreto. ....	43
Gráfico 9: Absorção de água do concreto. ....	45
Gráfico 10: Índice de vazios do concreto. ....	47
Gráfico 11: Resistência à compressão aos 28 dias – Fck 15 MPa. ....	47
Gráfico 12: Resistência à compressão aos 28 dias – Fck 35 MPa. ....	48
Gráfico 13: Incremento de resistência do concreto. ....	49
Gráfico 14: Redução do consumo de água. ....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDC	Concreto dosado em central
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VSI	<i>Vertical shaft impactor</i> (britador de eixo vertical)

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	OBJETIVOS .....	14
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	14
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
2.1	CONCRETO .....	15
2.1.1	<b>Cimento</b> .....	16
2.1.2	<b>Areia</b> .....	16
2.1.3	<b>Pedra britada</b> .....	17
2.1.4	<b>Aditivos</b> .....	17
2.1.5	<b>Água</b> .....	18
2.2	AGREGADO GRAÚDO .....	19
2.2.1	<b>Matéria-prima</b> .....	19
2.2.2	<b>Produção do agregado</b> .....	19
2.2.3	<b>Tipos de britadores</b> .....	20
2.3	ÍNDICE DE FORMA .....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	25
3.1	BENEFICIAMENTO DO AGREGADO .....	26
3.2	ESCOLHA DOS TRAÇOS .....	27
3.3	CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS .....	29
3.3.1	<b>Granulometria</b> .....	30
3.3.2	<b>Propriedades físicas do agregado miúdo</b> .....	30
3.3.3	<b>Propriedades físicas do agregado graúdo</b> .....	32
3.3.4	<b>Índice de forma</b> .....	33
3.4	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	33

3.5	ROMPIMENTO DO CONCRETO.....	34
3.6	PROPRIEDADE FÍSICAS DO CONCRETO .....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	GRANULOMETRIA .....	36
4.2	MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS.....	41
4.3	MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO .....	42
4.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS.....	44
4.5	ABSORÇÃO DE ÁGUA DO CONCRETO .....	44
4.6	ÍNDICE DE FORMA.....	45
4.7	ÍNDICE DE VAZIOS .....	46
4.8	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	47
5	CONCLUSÃO.....	50
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	51
	REFERÊNCIAS .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por concreto é crescente, bem como a necessidade de se construir com qualidade, economia e rapidez. Uma das respostas para isto é o uso de concreto dosado em central (CDC), também conhecido como concreto usinado. O CDC é preparado por empresas concreteiras e transportado até a obra por meio de caminhões betoneira (MAYOR, 2017).

A ABESC - Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (2007) recomenda que para obtenção de um concreto de qualidade se fazem necessários uma série de cuidados. Estes cuidados vão desde a escolha criteriosa dos materiais, a determinação de um traço que garanta a resistência e durabilidade do produto, uma boa homogeneização da mistura, aplicação e adensamento corretos até, por fim, um processo de cura adequado que garanta a perfeita hidratação do cimento.

A capacidade de produção de grandes volumes de concreto somado ao controle de qualidade, obtido com a industrialização do processo, permite atender o volume crescente de consumo deste insumo. Uma das principais vantagens desta solução é o racionamento de insumos, visto que existe um controle maior sobre a quantidade de cada componente (água, areia, brita, cimento e aditivos) e este controle garante que o concreto entregue pronto se comporte como foi projetado (MAYOR, 2017).

Segundo a ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland (2000), os agregados utilizados em concretos constituem de 60 a 80% de seu volume final. São materiais granulares sem forma e volume definidos cujas características impactam diretamente na qualidade do produto final. Entre as características que mais se destacam para a fabricação de concreto está a forma do agregado, que no estado fresco afeta sua coesão, consistência e trabalhabilidade e no estado endurecido a resistência à compressão, estabilidade dimensional, durabilidade, resistência à abrasão e aspecto visual.

Visto que, em se tratando de CDC, o controle rigoroso dos materiais é fundamental para um bom resultado final, este trabalho estudou o impacto de um dos componentes da mistura (a brita 1), mais especificamente em relação a sua forma.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), de acordo com a NBR 7211 (2009), estabelece limites para a presença de partícula com índice de forma superior a 3 (três). Índice este que representa a relação entre a maior e a menor dimensão do agregado e, segundo o Eng. Carlos Gustavo Marcondes (2009) – Assessor Técnico Comercial da Cimentos Itambé – isto se justifica pelo fato de as britas lamelares acumularem mais bolhas de ar e de exsudação sob as mesmas, o que prejudica a resistência e a durabilidade do concreto. Além disso, partículas desta forma exigem um esforço maior durante o bombeamento, o que é resolvido aumentando-se o teor de argamassa. Esta solução implica em um maior consumo de cimento e consequentemente um aumento significativo no custo de produção.

Este trabalho aborda o impacto nas propriedades físicas e mecânicas da substituição gradativa de britas lamelares por partículas mais cúbicas, podendo levar a uma redução no consumo de cimento. O estudo busca justificar a viabilidade, ou não, do uso de uma etapa adicional de britagem para a alteração do índice de forma do material.

Esta pesquisa experimental foi realizada utilizando 6 (seis) formulações diferentes, 3 (três) usando concreto de Fck 15 MPa e 3 (três) com concreto de Fck 35MPa. Para cada um dos concretos foi feita a substituição gradativa da brita 1 de forma mais lamelar pela de forma mais cúbica nas proporções de 0%, 50% e 100%. Com os corpos de prova moldados foram realizados ensaios de compressão, regidos pela norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Posteriormente, foram determinados os índices físicos do concreto resultante de cada formulação.

Neste trabalho, a brita de forma mais lamelar foi tratada como *NORMAL*, por ser o material correntemente utilizado na empresa. A brita de forma mais cúbica foi nomeada *VSI*, pois passou por um britador de eixo vertical denominado Britador VSI.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as propriedades físicas resultantes da substituição do agregado graúdo (brita 1) *NORMAL* por *VSI* na resistência à compressão axial simples do concreto no estado endurecido.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Escolha das formulações de concreto com resistências de 15 MPa e 35 MPa com diferentes proporções de brita *NORMAL/VSI*;
- b) Caracterizar os agregados miúdos e graúdos (brita 1 *NORMAL*, brita 1 *VSI*, brita 0, areia natural e areia artificial) por: granulometria, origem, forma, absorção de água, densidade aparente e massa unitária;
- c) Romper os corpos de prova aos 28 dias para verificação da resistência à compressão simples;
- d) Analisar as propriedades físicas do concreto em todas as diferentes formulações do concreto: Absorção de água, índice de vazios e absorção aparente.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

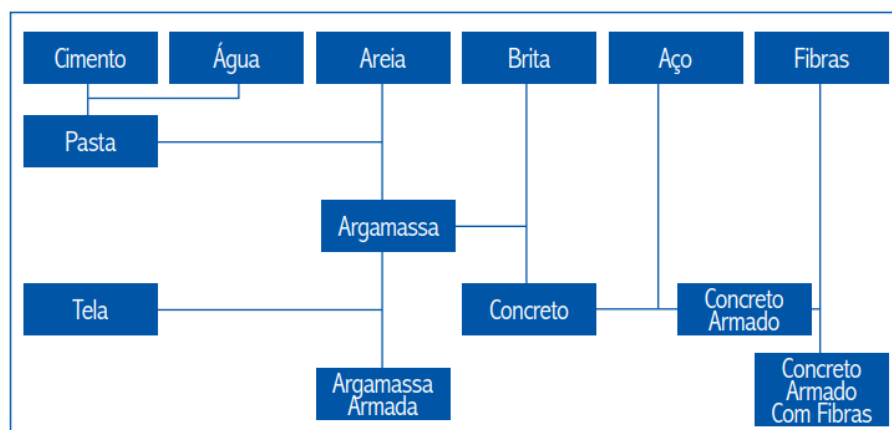
Este capítulo apresenta o conhecimento básico necessário para a compreensão do assunto abordado neste trabalho. O concreto e seus componentes, o agregado graúdo e sua produção e o índice de forma.

### 2.1 CONCRETO

Para Neville e Brooks (2013), o concreto, em um sentido amplo, é o produto obtido a partir do uso de um meio cimentante. Esse meio, geralmente, é o produto da reação da água com um cimento hidráulico e constitui a parte principal do produto final, tendo os agregados como produto de enchimento.

O cimento quando hidratado reage lentamente e forma uma pasta que une os agregados, graúdo e miúdo, que passa a ser denominada de concreto. Este conjunto inicialmente encontra-se em um estado plástico, podendo ser moldado nas mais diversas formas, texturas e finalidades. Após o início de seu endurecimento, o ganho de resistência é contínuo. Adições e aditivos também podem vir a fazer parte desta mistura, dependendo da aplicação desejada. A Figura 1 apresenta as diversas configurações possíveis que essa mistura pode assumir (ABESC, 2007).

Figura 1: Possibilidade de uso do concreto.



Fonte: ABESC (2007).



Também é possível enxergar o concreto como um material de duas fases: a pasta de cimento hidratada e os agregados. Isto resulta em um comportamento que é regido pelas propriedades das duas fases, bem como pela interface entre elas (NEVILLE E BROOKS, 2013).

### **2.1.1 Cimento**

Denominado tecnicamente como Cimento Portland, o cimento foi criado e patenteado por Joseph Aspdin em 1824. Consiste em um pó fino com propriedades aglutinantes que uma vez endurecido não se decompõe mais. É dito um aglomerante hidráulico, pois endurece quando misturado com água, e é sem dúvidas o mais importante dos aglomerantes conhecido pelo homem. O bom conhecimento de suas propriedades é fundamental para aproveitá-las da melhor forma possível (AMBROZEWICZ, 2012).

Segundo a definição de Bauer (2013), o cimento é um produto “[...] obtido pela pulverização de clínquer constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com certa proporção de sulfato de cálcio natural [...]”. Eventualmente podem ser adicionadas outras substâncias, de modo a modificar suas propriedades.

Clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro produzido através do aquecimento a altas temperaturas de matérias primas pré-determinadas. O cálcio necessário geralmente é extraído de pedra calcária, giz, mármore e conchas do mar, enquanto que a sílica vem de argilas e xistos argilosos. Esta matéria prima forma uma farinha que após as reações à alta temperatura em fornos, forma o clínquer (AMBROZEWICZ, 2012).

### **2.1.2 Areia**

A areia é um agregado miúdo proveniente da desintegração de rochas, seja por processos naturais ou artificiais. Quando resultante da ação de agentes da natureza, é dita areia natural. É chamada de areia reciclada quando oriunda de processos de reciclagem e areia artificial quando proveniente do processo de cominuição mecânica de rochas (ABNT, 2011).

As areias são consideradas como agregado miúdo e sua graduação varia de 0,15 mm a 4,8 mm. Elas ainda podem ser separadas em 4 faixas: muito fina, fina,

média e grossa. Todas as faixas tem a mesma graduação 0,15/4,8 mm e se diversificam pelas diferentes porcentagens de tamanho de grãos (ABNT, 2009).

### **2.1.3 Pedra britada**

A pedra britada é o produto resultante da cominuição de rochas e se caracteriza por tamanhos nominais de grãos enquadrados entre 2,4 e 64 mm (ABNT, 2009).

Segundo o Ministério de Minas e Energia, por meio do Relatório Técnico 30 – Perfil de brita para construção civil (2009), os produtos oriundos de pedreira são: rachão, gabião, brita graduada, brita corrida, pedra ou brita 1, pedra ou brita 2, pedra ou brita 3, pedra ou brita 4, pedra ou brita 5, pedrisco ou brita 0, pó de pedra e areia de brita. Suas respectivas granulometrias são:

- a) Rachão: material obtido após o desmonte da rocha por explosivo;
- b) Gabião: dimensões entre 100 mm e 150 mm;
- c) Brita graduada: mistura de tamanhos de zero até o máximo especificado com controle de granulometria definido pelo consumidor;
- d) Brita 0 ou pedrisco: granulometria variando de 4,8 mm a 9,5 mm;
- e) Brita 1: granulometria variando de 9,5 mm a 19 mm;
- f) Brita 2: granulometria variando de 19 mm a 25 mm;
- g) Brita 3: granulometria variando de 25 mm a 50 mm;
- h) Brita 4: granulometria variando de 50 mm a 76 mm;
- i) Brita 5: granulometria variando de 76 mm a 100 mm;
- j) Bica corrida: mistura de tamanhos variando de zero a 50 mm, sem exigência de controle granulométrico;
- k) Pó de pedra: fração de finos de britagem, variando de zero a 5 mm, alto teor de finos (máximo de 20%) passantes na malha 200 (0,074 mm);
- l) Areia de brita: pó de pedra sem partículas abaixo da malha 200.

### **2.1.4 Aditivos**

Aditivos são substâncias adicionadas ao concreto com finalidade de melhorar suas características. Dentre as diversas classificações dos aditivos, as principais são: plastificantes; incorporadores de ar; produtos de cura; dispersores;

impermeabilizantes; produtores de gás ou espuma; aceleradores e retardadores (AMBROZEWICZ, 2012).

Bauer (2013) define aditivos como todo produto não indispensável à composição e finalidade do concreto, podendo ser adicionado imediatamente antes ou durante a mistura na betoneira. Geralmente, são usados em pequenas quantidades e devem ser bem homogeneizados, fazendo aparecer ou reforçando certas características do concreto.

Neste trabalho o aditivo utilizado foi um plastificante. Plastificantes são aqueles que agem melhorando a plasticidade do concreto, possibilitando melhor compactação com menos uso de energia. Os plastificantes agem na superfície das partículas de cimento, causando repulsão entre os grãos mergulhados na água da mistura ocasionando o aumento do abatimento. Deste modo, o consumo de água é reduzido e, conseqüentemente, há um aumento na resistência e diminuição na retração. Possibilidades de uso para este tipo de aditivo são: aumentar a resistência aos esforços mecânicos; melhorar a trabalhabilidade e diminuir a exsudação (AMBROZEWICZ, 2012).

### **2.1.5 Água**

Comumente tratada por “água de amassamento”, a água é utilizada em quase todos os serviços de engenharia, seja como componente ou como ferramenta. Na produção de concreto é utilizada na limpeza de equipamentos, no resfriamento e na cura do concreto. Para cada metro cúbico de concreto são utilizados em média de 160 a 200 litros (AMBROZEWICZ, 2012).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) prescreve que a água destinada ao amassamento deve ser isenta de corpos estranhos e teores elevados de substâncias prejudiciais. É estabelecido um pH entre 5,8 e 8,0 e valores limites máximos de: 3 mg/l de matéria orgânica; 5000 mg/l de resíduo sólido; 300 mg/l de sulfatos; 500 mg/l de cloretos e 5 mg/l de açúcar.

## 2.2 AGREGADO GRAÚDO

Segundo a NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado graúdo é o “[...]agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos peneira com abertura de malha de 4,75 mm, atendidos os requisitos da ABNT NBR 7211.”

### 2.2.1 Matéria-prima

Para a produção de agregados para a construção civil é importante levar em conta quais as rochas disponíveis, bem como suas características, para que se escolha aquela que se mostre mais vantajosa para o tipo de agregado que se queira produzir. Basalto, granito, gnaiss, calcário e arenito são os mais comumente utilizados (BAUER, 2013).

O processo de britagem utilizado na obtenção do agregado, em especial o equipamento utilizado e o tipo de britagem, influenciam as características finais do produto. Essa influência se reflete nas propriedades do concreto produzido com este material (GONÇALVES *et al*, 2007 apud ARNOLD, 2011).

### 2.2.2 Produção do agregado

A produção de agregados em pedreiras consiste em sucessivos processos de cominuição de algum tipo de rocha, proveniente de uma jazida, reduzindo-a a fragmentos de tamanhos adequados. Na jazida, a fragmentação ocorre por meio de explosivos, que produzem blocos que podem superar um metro de diâmetro. Em seguida, a rocha é britada, rebitada, lavada, classificada e estocada (BAUER, 2013).

A etapa primária do processo é a britagem e utiliza um britador de mandíbulas, dependendo da dimensão da rocha a ser britada e da qualidade do produto desejado. Esta etapa pode requerer mais de um estágio. As etapas posteriores são chamadas de secundária, terciária e quaternária, e é ao longo delas que é realizado o controle granulométrico do agregado (CHAVES, 2005 apud ARNOLD, 2011).

### 2.2.3 Tipos de britadores

Os britadores utilizados na produção dos agregados presentes neste trabalho são apresentados a seguir. Os dois primeiros britadores apresentados são os que produzem a brita *NORMAL*. A utilização do terceiro britador listado produz a brita *VSI*, de forma mais cúbica.

#### 2.2.3.1 Britador de mandíbulas

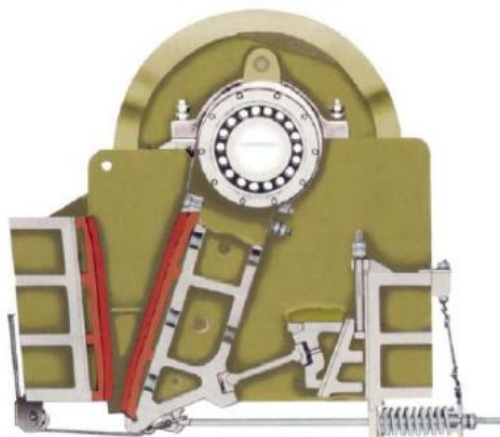
Britadores de mandíbulas são máquinas simples e robustas, projetadas para britar as rochas mais duras e manter seu desempenho sob condições severas de operação com a mínima necessidade de manutenções (METSO MINERALS, 2005).

São divididos em dois tipos, de um ou de dois eixos. Os britadores de um eixo podem ser utilizados como britadores primários ou rebitadores secundários, sendo ideais para instalações de britagem de pequeno porte. Os britadores de dois eixos são indicados para pedreiras, minerações e indústrias onde se faz necessária a britagem primária de materiais extremamente resistentes, duros e/ou abrasivos (METSO MINERALS, 2005).

O movimento da mandíbula é gerado por um eixo sem excentricidade, resultando em uma cominuição do material essencialmente por compressão. O material britado é carregado pela gravidade, evitando ser arrastado nas mandíbulas.

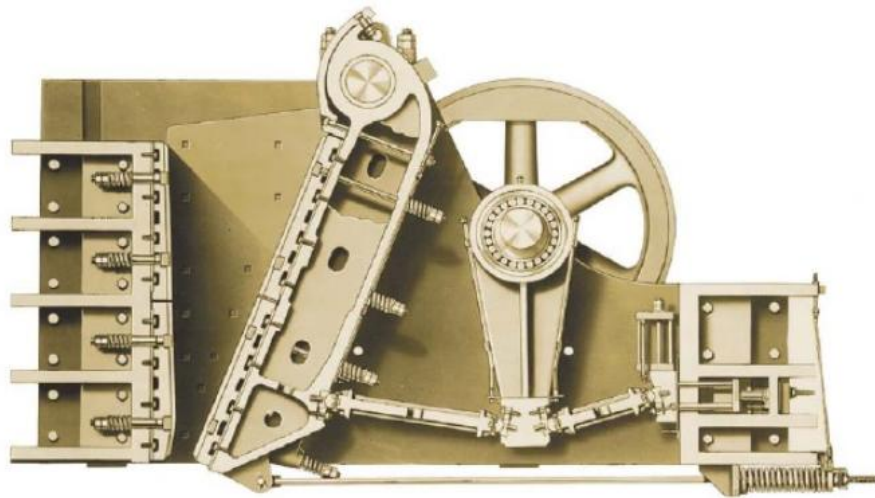
Britadores de mandíbula são apresentados nas Figuras 2 e 3.

Figura 2: Britador de mandíbulas de 1 eixo.



Fonte: METSO MINERALS (2005).

Figura 3: Britador de mandíbulas de 2 eixos.

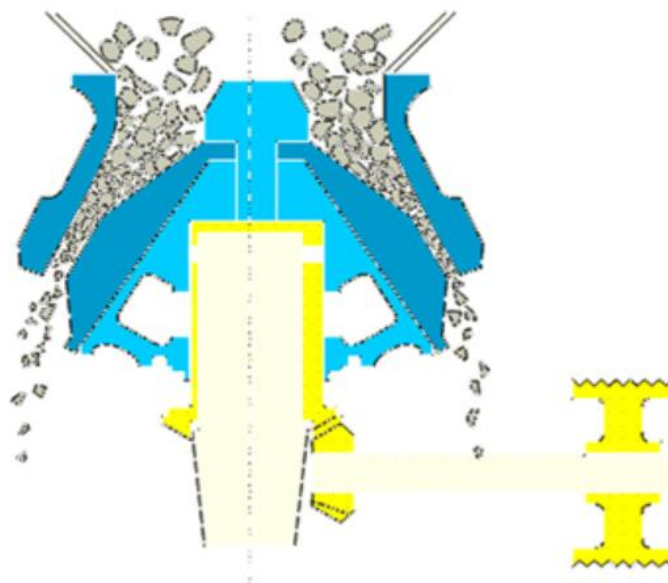


Fonte: METSO MINERALS(2005).

#### 2.2.3.2 Britador giratório e de cone

Como representado na Figura 4, britadores giratórios e de cone são constituídos por uma armação, um dispositivo de transmissão, um eixo oco concêntrico, rolamento em forma de tigela, um cone de esmagamento, molas e uma estação de pressão hidráulica (HJ CRUSHER, 2008).

Figura 4: Vista em corte de britador de cone.



Fonte: HJ CRUSHER (2008).

Este equipamento funciona com a giração de um eixo excêntrico por um eixo horizontal e um par de engrenagens cônicas. O movimento do eixo excêntrico faz com que o cone de britagem oscile em direção à superfície de britagem do cone fixo. Este movimento faz com que as rochas e minérios que entram pela abertura superior sejam prensados e triturados (HJ CRUSHER, 2008).

Este britador é mais avançado e eficiente que o de mandíbulas e permite um melhor controle sobre o tamanho do produto final, que pode ser regulado através do ajuste da largura do furo de descarga (HJ CRUSHER, 2008).

#### 2.2.3.3 *Impactador de rocha contra rocha*

Impactadores de rocha contra rocha operam segundo o princípio de britadores de eixo vertical, os chamados Britadores VSI (*vertical shaft impactor*).

Seu funcionamento se dá por meio da descarga do agregado sobre impulsos que giram em altas velocidades. A força centrífuga gerada pelo movimento de rotação atira as partículas umas contra as outras e isto ocorre continuamente até o produto esteja completamente esmagado. Após o esmagamento, o material é descarregado pelo fundo da máquina e seu tamanho é controlado por peneiras que permitem que apenas os tamanhos desejados passem (HJ CRUSHER, 2008).

Figura 5: Vista em corte de britador VSI.



Fonte: METSO (2005).

Britadores VSI são excelentes para a britagem terciária ou quaternária de agregados, podendo gerar materiais finos com baixo custo e também agregados de grande qualidade, especialmente no tocante à cubicidade do produto e inclusive com rochas duras e abrasivas (METSO MINERALS, 2005).

A cominuição por impacto à alta velocidade melhora a resistência e o formato da rocha e reduz também a umidade, facilitando o peneiramento e gerando produtos superiores (METSO MINERALS, 2005). Britadores VSI operam com baixo nível de ruído, são seguros e fáceis de operar, são duráveis, rentáveis e exigem pouca manutenção (HJ CRUSHER, 2008).

Concretos produzidos com agregados beneficiados com britadores VSI tem um ganho em trabalhabilidade e bombeabilidade, devido as partículas cúbicas com arestas arredondadas geradas. Este processo vem sendo usado em escala crescente na produção de areia de brita de qualidade que contribui para a substituição parcial, e por vezes integral, da areia natural. Isto confere ganhos de qualidade ao concreto como também ao meio ambiente (METSO MINERALS, 2005).

## 2.3 ÍNDICE DE FORMA

O índice de forma permite avaliar a qualidade do agregado graúdo em relação à forma dos grãos. Esta forma influi diretamente na qualidade do concreto ao alterar a sua trabalhabilidade e afeta, em consequência, o bombeamento, lançamento e adensamento (BAUER, 2013).

Como dito por Mehta e Monteiro (1994), a forma dos agregados influencia as propriedades mais no estado fresco que endurecido. Partículas angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento para se tornarem trabalháveis, aumentando o custo do concreto.

Os grãos podem ser classificados como cúbicos, alongados e lamelares, sendo os grãos cúbicos os mais adequados para o uso na produção do concreto. Agregados industrializados tem sua forma dependente da rocha de origem e do processo de britagem. Basaltos, por exemplo, são suscetíveis a formarem partículas lamelares, bem como os britadores de mandíbula, sendo esta a pior combinação para a produção de agregado para concreto (BAUER, 2013).

A forma das partículas do agregado graúdo deve ser preferencialmente equidimensional, pois grãos que se afastam desta forma tem maior área superficial e



se acomodam de maneira anisotrópica. Partículas que se afastam desta forma são as alongadas e lamelares. Visto que as lamelares tendem a se orientar segundo um plano, são as mais capazes de prejudicar a durabilidade do concreto, pois a água de exsudação e bolhas de ar se acumulam sobre elas (NEVILLE, 1997).

A determinação do índice de forma é regida pela ABNT NBR 7809:2006 – Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais e a metodologia utilizada nesta pesquisa. A pesquisa foi realizada parte no laboratório da empresa Mineração Concreto, localizada no município de Nova Aurora – PR e parte no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Santa Catarina no Centro Tecnológico de Joinville.

O cimento utilizado foi o CP II F 40, da Votorantim Cimentos. O produto é adquirido à granel e estocado em silos específicos para este fim. O material foi retirado e imediatamente utilizado, evitando a deterioração do produto.

O aditivo utilizado foi plastificante poli funcional Fortmix R100, que proporciona fluidez evitando segregação quando se deseja características de maior trabalhabilidade.

A areia artificial, brita 0 e brita 1, são provenientes da pedreira Mineração Trevo, empresa contígua à concreteira em que foi realizado o estudo e que faz sua exploração em uma jazida de basalto.

A areia natural é extraída no Rio Paraná, no município de Guaíra, Paraná. A comercialização é feita pela empresa Mineração Trevo.

A fim de compreender os fatores que levaram a alteração das propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido, os materiais utilizados precisaram ser estudados e classificados. Portanto, a pesquisa foi dividida em 6 etapas, que são:

- a) Beneficiamento do agregado, gráudo transformando a brita *NORMAL* em *VSI*;
- b) Escolha dos traços do concreto;
- c) Caracterização dos agregados;
- d) Produção de corpos de prova;
- e) Análise no estado fresco
- f) Rompimento de corpos de prova à compressão;
- g) Determinação das propriedades físicas do concreto no estado endurecido.

### 3.1 BENEFICIAMENTO DO AGREGADO

Com exceção da areia natural, todos os agregados utilizados pela empresa Mineração Concreto são produzidos por uma pedreira instalada em sua vizinhança, a Mineração Trevo.

A matriz mineral disponível é o basalto e o processo de britagem passa por 3 etapas. A primária em um britador de mandíbulas e a secundária e terciária em britadores de cone. Esta configuração de britadores junto as características do basalto comumente fornecem britas de formato lamelar.

No entanto, a pedreira dispõe de uma quarta etapa de britagem que é utilizada quando se faz necessário um maior beneficiamento em seu material. Nesta etapa é utilizado um britador de eixo vertical que opera por meio do impacto de rocha contra rocha, equipamento este chamado de Britador VSI (*vertical shaft impactor*).

Após o beneficiamento a, parcela resultante da britagem classificada como brita 1, foi utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 6: Brita 1 cúbica x lamelar.



Fonte: Autor (2017).

### 3.2 ESCOLHA DOS TRAÇOS

Os traços utilizados neste trabalho foram obtidos na empresa Mineração Concreto, sendo escolhidos os de menor e maior resistência disponíveis.

O foco do trabalho foi a substituição gradativa de parte do agregado graúdo, mais especificamente da brita 1. Os traços foram identificados como:

- a) 100/0 – contém 100 % de brita *NORMAL* e 0 % de brita *VSI*;
- b) 50/50 – contém 100 % de brita *NORMAL* e 0 % de brita *VSI*;
- c) 0/100 – contém 100 % de brita *NORMAL* e 0 % de brita *VSI*.

Os traços utilizados são comercializados pela sua resistência e com slump 10  $\pm$  2 cm. São utilizados principalmente em situações de bombeamento. Os traços fornecidos representam a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto, mas neste trabalho foram convertidos para um traço unitário com base no cimento. A Tabela 1 a seguir apresenta os traços obtidos.

Tabela 1: Traços fornecidos pela empresa.

Traço	Cimento (kg)	Areia Natural (kg)	Areia de Brita (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Aditivo (l)	Água (l)
<b>Fck 15 MPa</b>	220	800	200	250	750	1,6	180
<b>Fck 35 MPa</b>	330	695	175	250	750	2,64	180
<b>Fck 15 MPa</b>	1	3,64	0,91	1,14	3,41	0,0073	0,82
<b>Fck 35 MPa</b>	1	2,11	0,53	0,76	2,27	0,008	0,54

Fonte: MINERAÇÃO CONCRETO, adaptado pelo autor (2017).

Como a substituição da brita 1 *NORMAL* pela *VSI* acarretou em um aumento da trabalhabilidade, foi feita uma redução na água utilizada, de modo a manter o slump 10  $\pm$  2 como uma constante. Deste modo os traços resultantes são os apresentados na Tabela 2.

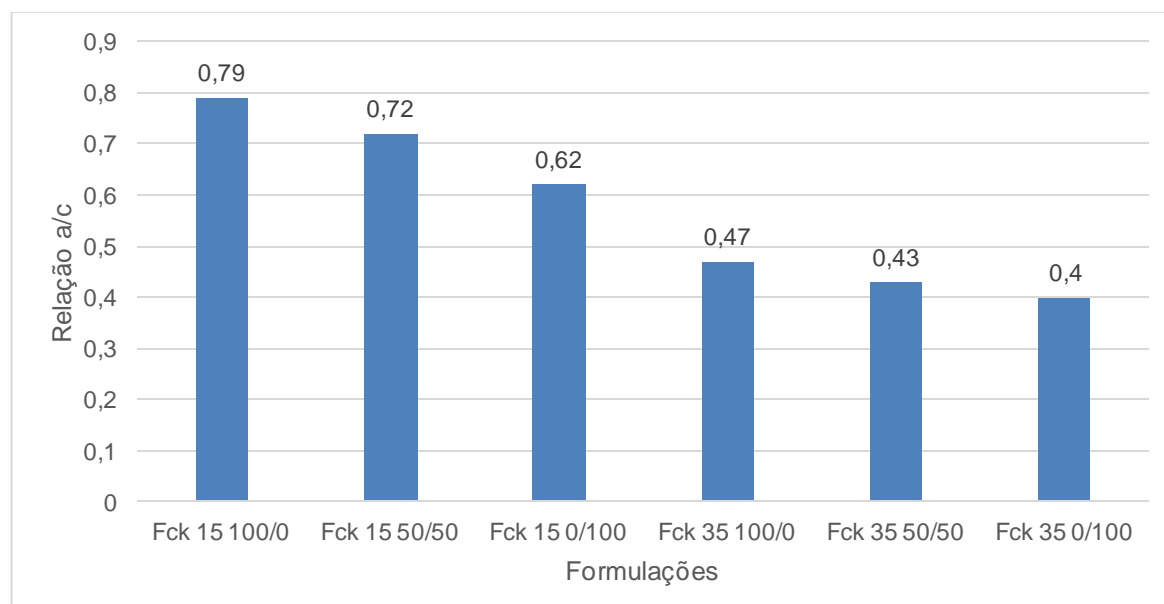
Tabela 2: Formulações utilizadas no trabalho.

Formulação	Cimento (kg)	Areia Natural (kg)	Areia de Brita (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 <i>NORMAL</i> (kg)	Brita 1 VSI (kg)	Aditivo (l)	Água (l)
<b>Fck 15 100/0</b>	1	3,64	0,91	1,14	3,41	0	0,0073	0,79
<b>Fck 15 50/50</b>	1	3,64	0,91	1,14	1,705	1,705	0,0073	0,72
<b>Fck 15 0/100</b>	1	3,64	0,91	1,14	0	3,41	0,0073	0,62
<b>Fck 35 100/0</b>	1	2,11	0,53	0,76	2,27	0	0,008	0,47
<b>Fck 35 50/50</b>	1	2,11	0,53	0,76	1,135	1,135	0,008	0,43
<b>Fck 35 0/100</b>	1	2,11	0,53	0,76	0	2,27	0,008	0,4

Fonte: MINERAÇÃO CONCRETO, adaptado pelo autor (2017).

Esta redução no consumo de água alterou a relação a/c (água/cimento) das formulações, apresentados no Gráfico 1 a seguir.

Gráfico 1: Relação A/C das formulações.



Fonte: Autor (2017).

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS

A classificação dos agregados foi realizada no laboratório da UFSC e determinou a granulometria, massa específica e absorção de água de todos os agregados bem como o índice de forma dos agregados *NORMAL* e *VSI*.

Todos os ensaios foram realizados três vezes, tendo como resultado final a média dos resultados. As amostras utilizadas foram previamente reduzidas com o auxílio de um separador mecânico, de acordo com a NBR NM 27 – Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório (ABNT, 2001). A Figura 7 mostra o separador utilizado.

Figura 7: Separador mecânico utilizado



Fonte: Autor (2017).

Os agregados utilizados no trabalho são mostrados na figura 8 a seguir.

Figura 8: Agregados.



Fonte: Autor (2017).

### 3.3.1 Granulometria

Para a determinação da granulometria, foi utilizada a norma ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Esta norma apresenta as diversas peneiras que podem ser utilizadas, classificando-as em *Série Normal* e *Série Intermediária*. A Figura 9 lista as diferentes peneiras normatizadas.

Figura 9: Séries de Peneiras.

Serie Normal / <i>Série Normal</i>	Serie Intermedia / <i>Série Intermediária</i>
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Para a determinação da granulometria do agregado miúdo, foram utilizadas apenas peneiras da *Série Normal*, começando na de 4,75 mm até 150 µm. Para o agregado graúdo, fez-se uso também da peneira 9,5 mm da *Série Normal* e da 12,5 mm e 6,3 mm da *Série Intermediária*. A Figura 10 apresenta as peneiras utilizadas.

### 3.3.2 Propriedades físicas do agregado miúdo

A metodologia da obtenção das propriedades físicas, massa específica e absorção de água, são apresentadas nesta seção.

#### 3.3.2.1 Massa específica

A massa específica representa a relação entre a massa do agregado seco em estufa até a constância de massa e o volume do sólido, excluindo os poros

permeáveis. Devido à disponibilidade do equipamento e maior praticidade de execução, a determinação da massa específica do agregado miúdo foi utilizada a NBR 9776 – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman (ABNT, 1987).

Este frasco deve ser de vidro e composto de bulbos e de um gargalo graduado. O frasco deve conter uma marcação de 200 cm<sup>3</sup> no estrangulamento entre os dois bulbos e marcas de 375 cm<sup>3</sup> a 450 cm<sup>3</sup> acima dos bulbos. O frasco Chapman e sua utilização são representados na Figura 11.

Figura 10: Frasco Chapman vazio e com areias.



Fonte: Autor (2017).

#### 3.3.2.2 Absorção de água

A NBR NM 30 – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água (ABNT, 2001) define absorção como o processo pelo qual um líquido tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso.

Se faz necessário um circulador de ar quente para levar o agregado da condição de saturado até saturado com a superfície seca e um molde tronco-cônico metálico. O material deve ser alocado no molde e compactado com 25 golpes e ao retirar-se o molde, deve desmoronar. Esta situação representa o valor da absorção de água do agregado em porcentagem. As Figuras 12 e 13 mostram o material utilizado e a execução do ensaio.



Figura 11: Materiais utilizados no ensaio.



Fonte: Autor (2017).

Figura 12: Areia natural e areia artificial sendo ensaiadas.



Fonte: Autor (2017).

### 3.3.3 Propriedades físicas do agregado graúdo

A NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT 2002) rege os ensaios necessários para determinação das propriedades físicas das britas usadas no trabalho.

Foi necessário o uso de uma balança, um recipiente na forma de um cesto de arame e um tanque de água. As pesagens foram tomadas com o agregado nas condições seca, saturado com a superfície seca e submerso. Com esses dados a massa específica, massa específica aparente e absorção de água puderam ser determinadas.

Enquanto a determinação da massa específica não leva em conta os poros permeáveis, a da massa específica aparente o faz.

### 3.3.4 Índice de forma

O índice de forma foi determinado seguindo as orientações da ABNT NBR 7809:2006 – Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio.

Este ensaio requer o uso de um jogo de peneiras, para excluir as parcelas que contenham 5% ou menos da massa total do agregado, e um paquímetro com resolução de 0,1 mm.

Com estes equipamentos, foram tomadas as medidas da maior e da menor dimensão de um número de partículas definidas pela norma. A média da relação comprimento/espessura obtida com essas medições representa o índice de forma do material.

## 3.4 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram executados no laboratório da empresa Mineração Concreto e seguiram as orientações dispostas na norma NBR 5738 – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015).

Foram moldados 9 corpos de prova para cada uma das 6 formulações, resultando em um total de 54 corpos de prova neste trabalho que podem ser observados na Figura 14.

Figura 13: Corpos de prova retificados e preparados para o rompimento.



Fonte: Autor (2017).

### 3.5 ROMPIMENTO DO CONCRETO

Após 28 dias de cura em tanque de água, os corpos de prova foram devidamente retificados e seu rompimento foi realizado no laboratório da empresa Mineração Concreto, de acordo com a norma NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABTN, 2007). A prensa utilizada é mostrada na Figura 15.

Figura 14: Prensa hidráulica utilizada na ruptura do concreto.



Fonte: Autor (2017).

### 3.6 PROPRIEDADE FÍSICAS DO CONCRETO

Os ensaios de propriedades físicas foram feitos seguindo a ABNT NBR 9778:2005 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Os corpos de prova foram partidos em pedaços menores, como apresentados na Figura 16, e pesados nos estados: seco, saturado com a superfície seca e submerso. Com essas pesagens foi possível determinar os índices físicos do concreto no estado endurecido.

As propriedades absorção de água, índice de vazios, massa específica seca e massa específica saturada, são obtidas, respectivamente, pelas fórmulas apresentadas a seguir.

$$\frac{\text{Massa saturada} \times \text{Massa seco}}{\text{Massa seco}} \times 100$$

$$\frac{\text{Massa saturada} - \text{Massa seco}}{\text{Massa saturada} - \text{Massa satura, imersa em água}} \times 100$$

$$\frac{\text{Massa seco}}{\text{Massa saturada} - \text{Massa saturada, imersa em água}}$$

$$\frac{\text{Massa saturada}}{\text{Massa saturada} - \text{Massa saturada, imersa em água}}$$

Figura 15: Amostras para ensaio de índices físicos do concreto.



Fonte: Autor (2017).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção irá apresentar os resultados referentes aos estudos realizados neste trabalho.

### 4.1 GRANULOMETRIA

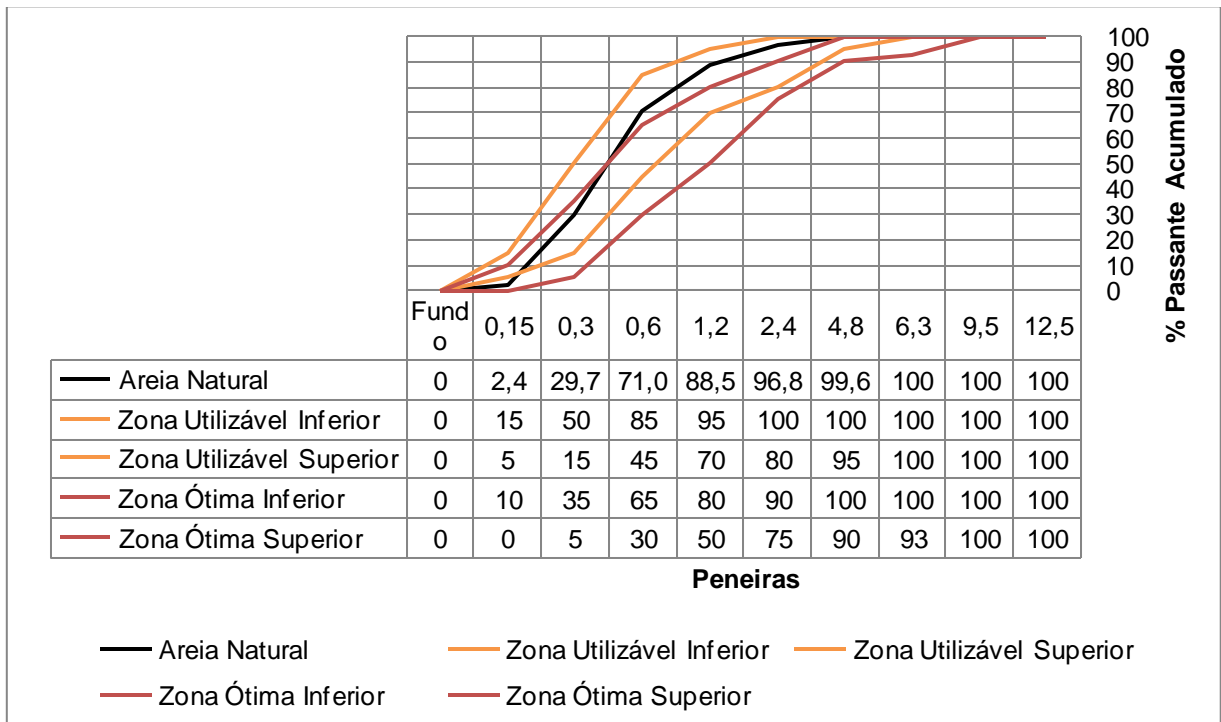
A faixa granulométrica das areias obtidas por meio de peneiramento, bem como as faixas granulométricas ótima e utilizável, apresentadas na NBR 7211 (ABNT, 2005), estão apresentadas na forma de gráficos *Peneiras x % Passante Acumulado* e discutidas a seguir.

Como pode ser observado no gráfico 2, a areia natural encontra-se quase toda dentro *Zona Utilizável*. Apenas na parte mais fina do material, mais precisamente na peneira de 150  $\mu\text{m}$ , passou menos material que o recomendado. Enquanto a *Zona Utilizável* indica um percentual recomendado de 5 a 15 que passa para o fundo, o material apresenta um passante de 2,4 %. Este valor é ainda melhor, havendo menos material fino na amostra. Isso se comprova observando a *Zona Ótima*, que indica um percentual passante de 0 a 10 para esta peneira.

O módulo de finura, que pode ser obtido por meio do somatório do percentual retido acumulado em todas as peneiras e dividido por cem, é de 2,12. Este valor está dentro do módulo de finura da *Zona Utilizável Inferior*, que, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), varia de 1,55 a 2,20 .

Com base nessas informações é possível afirmar que a areia natural utilizada é apta para a produção de concreto.

Gráfico 2: Curva granulométrica da areia natural.



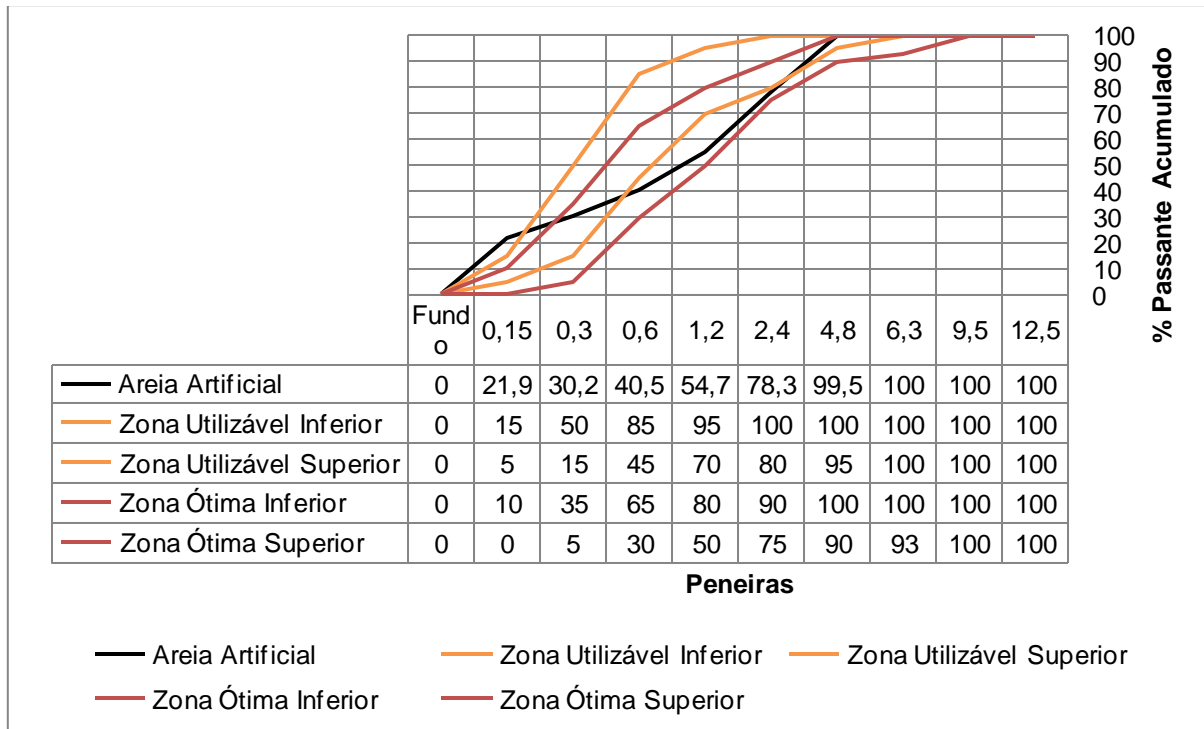
Fonte: Autor (2017).

O Gráfico 3 apresenta a granulometria da areia artificial e, com base nele, nota-se que é possível melhorá-la. Apesar de estar quase inteiramente dentro da *Zona Ótima*, na peneira de 150  $\mu$ m 21,9% do material passa para o fundo, o que indica uma grande presença de materiais finos.

O módulo de finura é de 2,75 e encontra-se dentro do módulo da *Zona Ótima*, que vai de 2,20 a 2,90, como definido pela NBR 7211 (ABNT, 2005).

Procedimentos como a lavagem do agregado ou um peneiramento adicional na fase de produção poderiam auxiliar na redução deste material fino e, consequentemente, reduzir o consumo de cimento. Esta redução no consumo acarretaria em uma diminuição no custo do concreto, mas, em contrapartida, esse beneficiamento extra do agregado acarretaria em um aumento no valor do agregado. Não cabe a este trabalho analisar esta variável, porém importante sugerir que a utilização de areia de brita proveniente do britador VSI também seria interessante no quesito de melhoria do produto final.

Gráfico 3: Curva granulométrica da areia artificial.



Fonte: Autor (2017).

As curvas granulométricas dos agregados graúdos e suas *Zonas Utilizáveis*, definida pela NBR 7211 (ABNT, 2008), são apresentadas e discutidas a seguir.

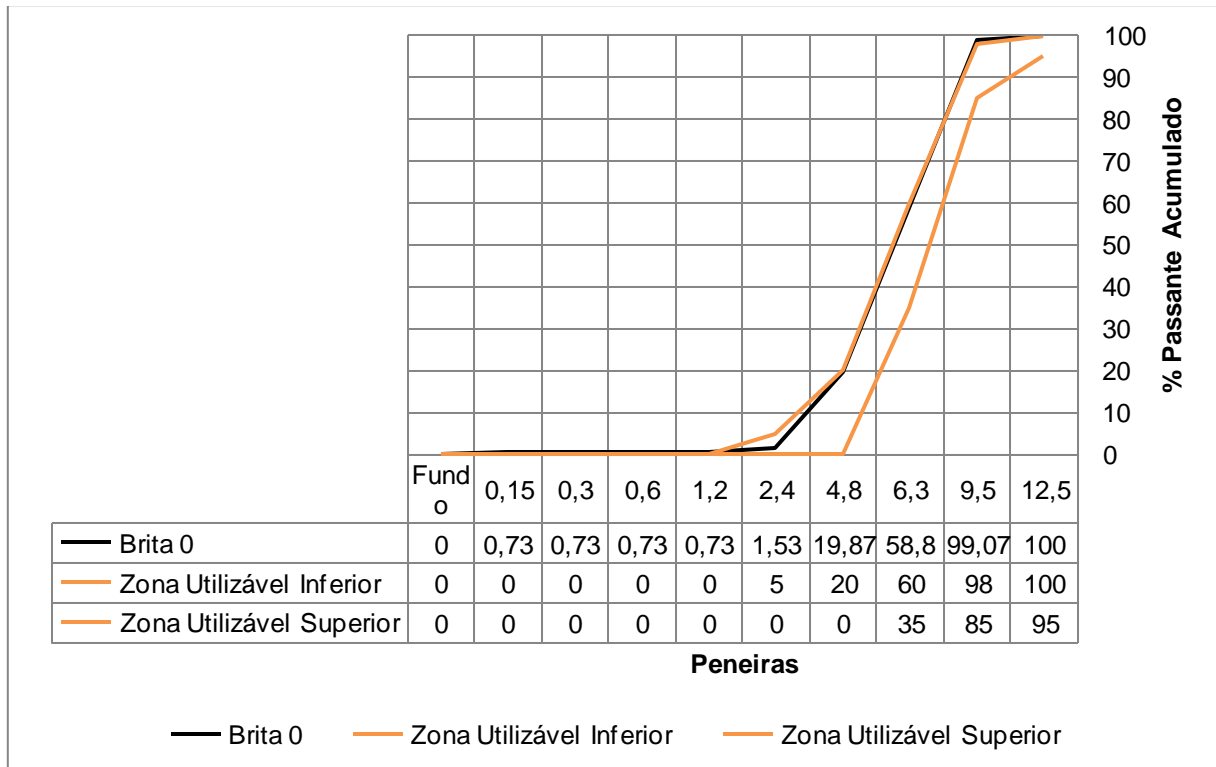
O Gráfico 4 demonstra que, apesar de estar com 1,07% de material passante a mais que o indicado pela *Zona Utilizável Inferior* na peneira de 9,5 mm, a brita 0 encontra-se praticamente toda dentro da faixa definida pela norma.

Há uma parcela irrisória de material, de 0,73%, que passa da peneira de 2,4 mm e vai até o fundo. Esse valor é explicado pela parcela de finos que fica aderido ao material e que, durante o processo mecânico de peneiramento, se desprende. Mesmo sendo uma pequena parcela, isso poderia ser resolvido com uma lavagem do material. No entanto, esse investimento dificilmente se justificaria na relação custo x benefício.

O material apresenta um módulo de finura de 6,18..

Novamente, vale ressaltar que a utilização de brita 0 proveniente de britador VSI também seria interessante na melhoria do concreto produzido, visto que sua forma também seria alterada e impactaria na trabalhabilidade do concreto.

Gráfico 4: Curva granulométrica da brita 0.



Fonte: Autor (2017).

A brita 1 *NORMAL* é o material em uso na produção de concreto na empresa estudada e que foi alvo da substituição abordada neste trabalho. Sua curva granulométrica pode ser observada acima no Gráfico 5.

Há uma pequena parcela, de 0,4%, de materiais que passam pela peneira de 6,3 mm até o fundo e que são explicados pelo material fino que se adere à superfície das partículas. Além disso, o material se encontra inteiramente dentro da *Zona Utilizável*.

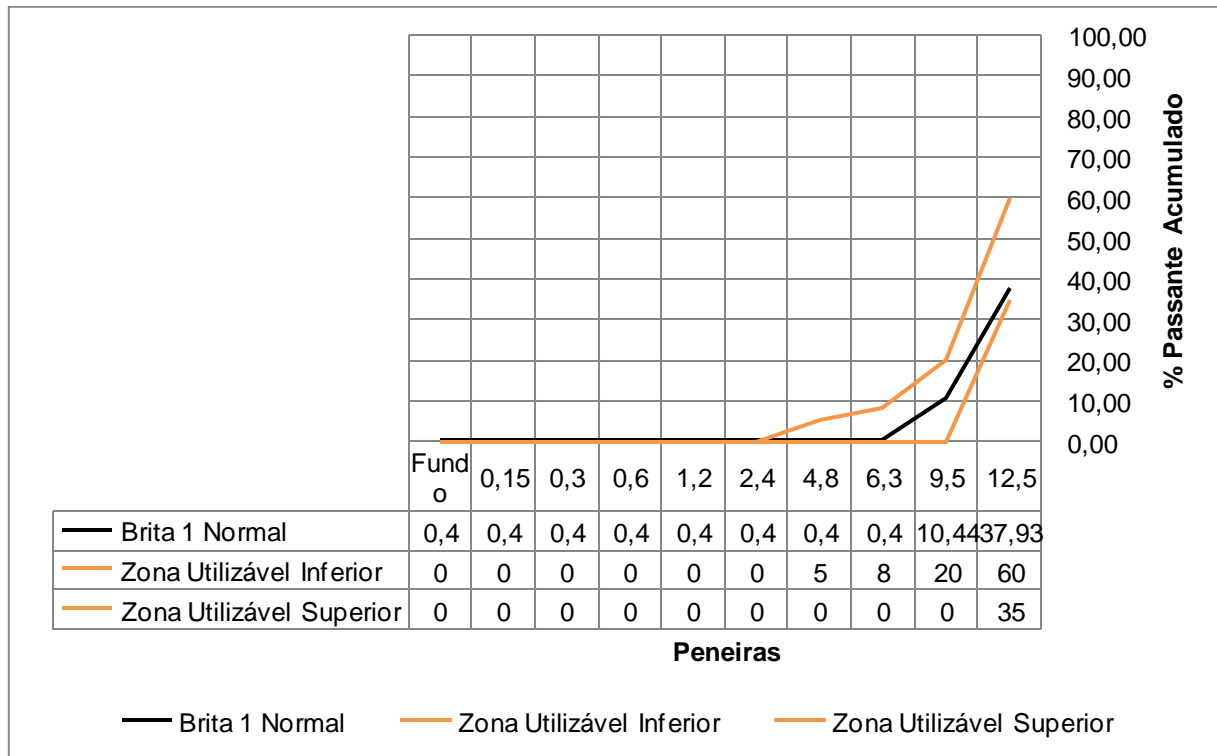
À primeira vista, este material parece ser ideal para a produção de concreto. Apresenta um módulo de finura de 9,49 e está perfeitamente dentro da faixa. No entanto, a forma lamelar do agregado permite que partículas que tenham uma das dimensões muito maiores que as das peneiras de 12,5 mm e 9,5 mm se enquadrem nesta faixa.

Esta característica, entre outros problemas, pode atrapalhar na execução da concretagem. Uma armadura que foi dimensionada para receber brita 1 ao receber uma partícula destas pode ter o preenchimento da forma prejudicado, ocasionando defeitos que devem ser corrigidos posteriormente.



Esta característica lamelar da partícula, que é o enfoque deste trabalho, foi melhor abordada no item 4.4.

Gráfico 5: Curva granulométrica da brita 1 *NORMAL*.



Fonte: Autor (2017).

A curva granulométrica apresentada no Gráfico 6 é a do material que foi beneficiado pelo britador VSI para o desenvolvimento deste trabalho.

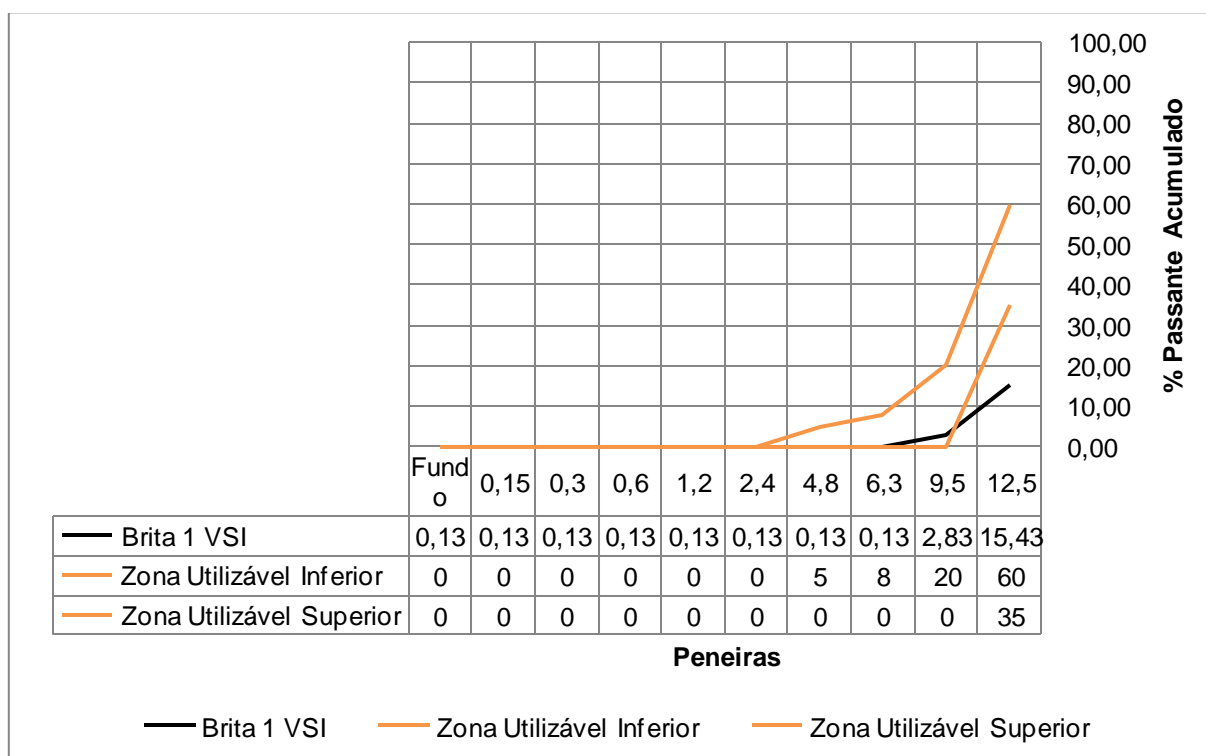
O problema dos finos presentes, que também foi identificado nos agregados graúdos apresentados anteriormente, ainda está presente, mas em menor quantidade. O processo adicional de britagem e peneiramento que o material passa auxilia nesta característica.

No entanto, após esta britagem o material ficou fora da curva recomendada pela NBR 7211 (ABNT, 2008). A maior parte do material, cerca de 85%, ficou retida na peneira de 12,5 mm. Este resultado pode ser compreendido quando se analisa que a redução da lamelaridade não permite que partículas que antes passavam pelo peneiramento em apenas uma direção passem mais, causando um acúmulo de material na peneira superior. Este resultado também é notado no módulo de finura, que subiu para 9,81.

Este maior percentual de partículas de maior dimensão é benéfico para o custo do concreto. Um mesmo volume de material, mas com partículas maiores, reduz a área superficial facilitando o envolvimento do agregado pela pasta de cimento e reduzindo seu consumo. A alteração da forma também aumenta a trabalhabilidade, permitindo a redução da água e consequentemente do cimento.

O problema das partículas grandes em excesso já foi citado anteriormente, a dificuldade encontrada no preenchimento das formas. Como as partículas são maiores, mas tem uma forma mais equidimensional, este problema acaba sendo equilibrado.

Gráfico 6: Curva granulométrica da brita 1 VSI.



Fonte: Autor (2017).

## 4.2 MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS

A massa específica das areias, bem como a massa específica com superfície seca e aparente das britas, são apresentadas nas tabelas 3, 4 e 5.

Os resultados apresentados representam a massa, em gramas, que cada agregado ocupa no volume de um centímetro cúbico.

Tabela 3: Massa específica das areias.

<b>Material</b>	<b>Massa Específica (g/cm³)</b>
<b>Areia Natural</b>	2,633
<b>Areia Artificial</b>	2,941

Fonte: Autor (2017).

Tabela 4: Massa específica seca do agregado graúdo.

<b>Material</b>	<b>Massa específica (g/cm³)</b>
<b>Brita 0</b>	2,927
<b>Brita 1 <i>NORMAL</i></b>	2,933
<b>Brita 1 <i>VSI</i></b>	2,947

Fonte: Autor (2017).

Tabela 5: Massa específica aparente do agregado graúdo.

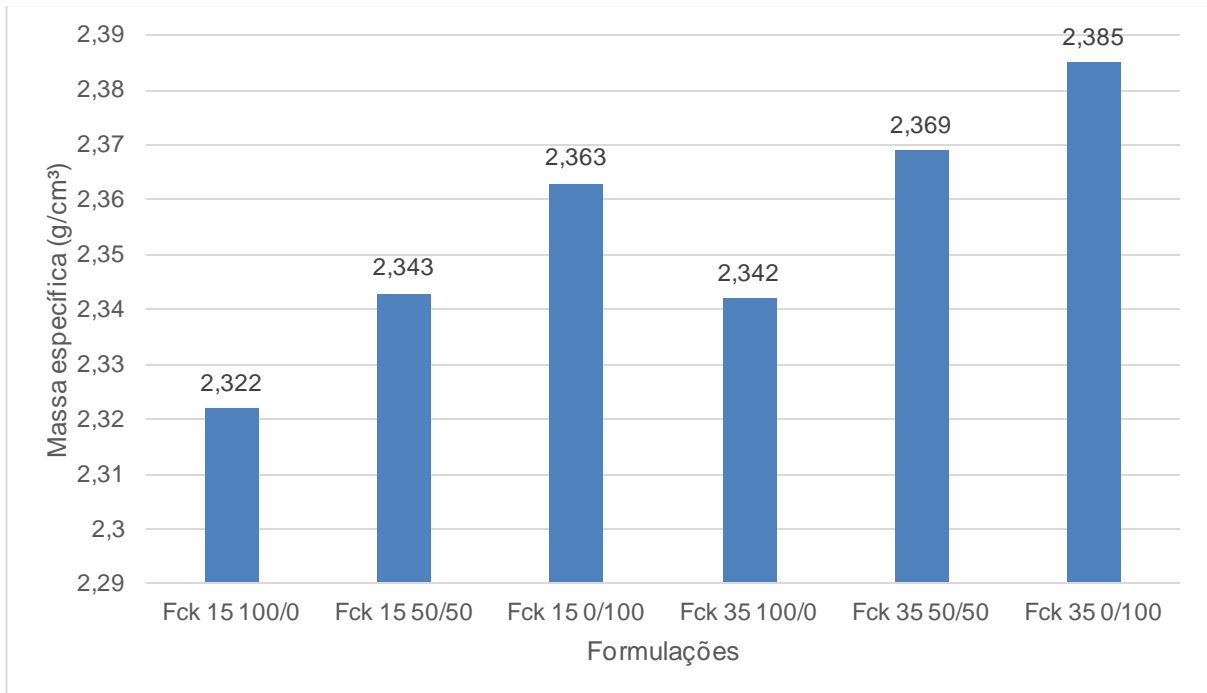
<b>Material</b>	<b>Massa esp. aparente (g/cm³)</b>
<b>Brita 0</b>	2,813
<b>Brita 1 <i>NORMAL</i></b>	2,853
<b>Brita 1 <i>VSI</i></b>	2,861

Fonte: Autor (2017).

#### 4.3 MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO

A massa específica, no Gráfico 7, e a massa específica saturada, no Gráfico 8, das 6 formulações estudadas são apresentadas a seguir.

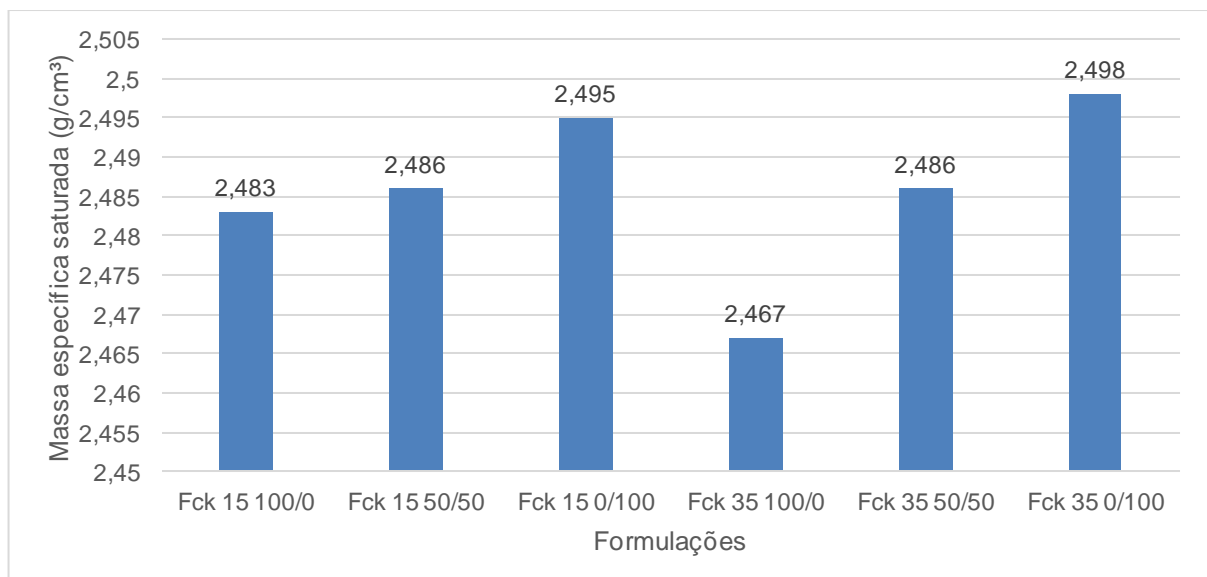
Gráfico 7: Massa específica do concreto.



Fonte: Autor (2017).

A massa específica aumentou progressivamente conforme o aumento do teor da substituição do agregado *NORMAL* pelo *VSI*. Esse resultado representa um melhor envolvimento dos agregados pela pasta de cimento, resultando em um menor índice de vazios e, conseqüentemente uma maior massa específica.

Gráfico 8: Massa específica saturada do concreto.



Fonte: Autor (2017).

A massa específica saturada, por sua vez, também aumentou conforme o percentual de substituição da brita 1 aumentou.

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS

Os valores de absorção dos agregados são demonstrados na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6: Absorção de água dos agregados.

<b>Material</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
<b>Areia Natural</b>	0,37
<b>Areia Artificial</b>	2,85
<b>Brita 0</b>	1,38
<b>Brita 1 <i>NORMAL</i></b>	0,95
<b>Brita 1 <i>VSI</i></b>	1,01

Fonte: Autor (2017).

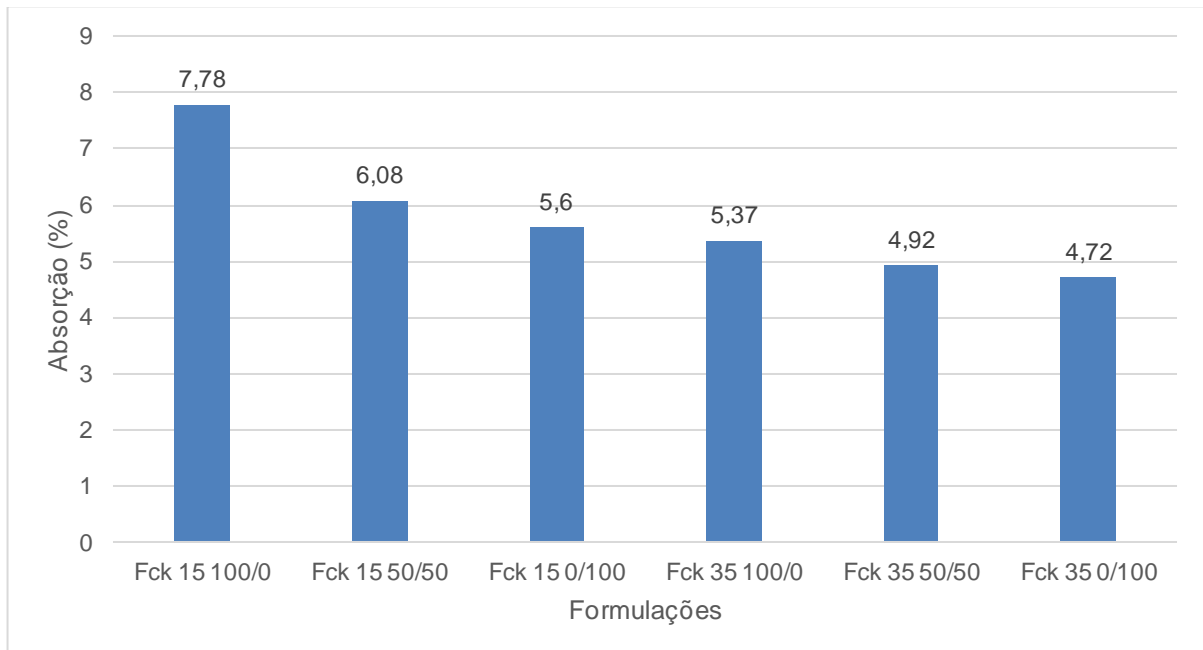
A maior absorção de água da Brita 0 é explicado pela maior área superficial do agregado, pois, em um mesmo volume, partículas menores apresentam maior área superficial.

O mesmo pode ser observado com a brita *VSI*. Partículas mais cúbicas apresentam maior área superficial que partículas lamelares, explicando a maior absorção de água que a da brita *NORMAL*.

#### 4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA DO CONCRETO

Os valores de absorção de água obtidos para as 6 formulações de concreto são demonstrados no Gráfico 9.

Gráfico 9: Absorção de água do concreto.



Fonte: Autor (2017).

A redução na absorção de água é observada tanto com o aumento da pasta de cimento quanto com o aumento da substituição do agregado.

Quanto maior a quantidade de cimento, maior o efeito da sua cristalização, reduzindo os poros e diminuindo a absorção de água. Isso explica a redução do concreto de Fck 35 MPa em relação ao de Fck 15 MPa.

Essa redução também se observa, crescentemente, conforme o aumento da substituição do material *NORMAL* pelo *VSI*. Isso se dá pelo maior empacotamento das partículas ocasionado pela cubicidade das partículas beneficiadas pelo britador *VSI*.

#### 4.6 ÍNDICE DE FORMA

Para determinação do Índice de Forma pelo método do paquímetro, regido pela NBR 7809 (ABNT, 2006), é necessária uma amostragem de 200 partículas que são medidas, uma a uma, na maior e na menor dimensão.

A determinação do índice de forma resultou em valores médios de 2,575 cm de comprimento e 1,03 cm de espessura para a brita 1 *NORMAL* e 2,315 cm de comprimento e 1,3 cm de espessura para a brita 1 *VSI*. O valor final representa a

relação entre a média da maior e a média da menor dimensão. O resultado obtido é um valor adimensional.

Tabela 7: Índice de forma da brita 1.

<b>Material</b>	<b>Índice de forma</b>
<b>Brita 1 <i>NORMAL</i></b>	2,5
<b>Brita 1 <i>VSI</i></b>	1,78

Fonte: Autor (2017).

A NBR 7211 (ABNT, 2005) define como máximo um índice de forma de 3. Deste modo, ambos os materiais de enquadram dentro do limite.

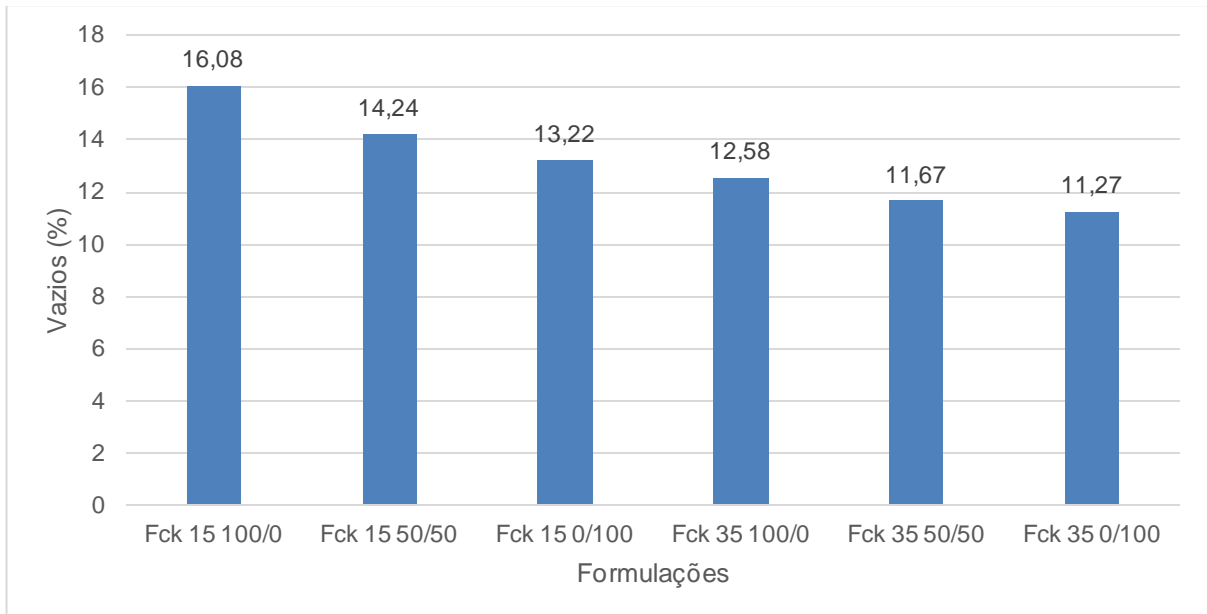
O beneficiamento do agregado pelo britador VSI causou uma redução do índice de forma da brita 1 em 28,81 %. Além de melhorar a trabalhabilidade do concreto, conseqüentemente permitindo uma redução no consumo de água, a redução do índice de forma permite uma leitura mais realista dos resultados de ensaios de granulometria, conforme abordado no item 4.1.

#### 4.7 ÍNDICE DE VAZIOS

O índice de vazios sofreu uma redução progressiva conforme a substituição do agregado aumentou. Isto se explica pela forma mais cúbica permitir um melhor intertravamento das partículas e melhor envolvimento pela pasta de cimento.

Estes resultados podem ser vistos no Gráfico 10 abaixo.

Gráfico 10: Índice de vazios do concreto.

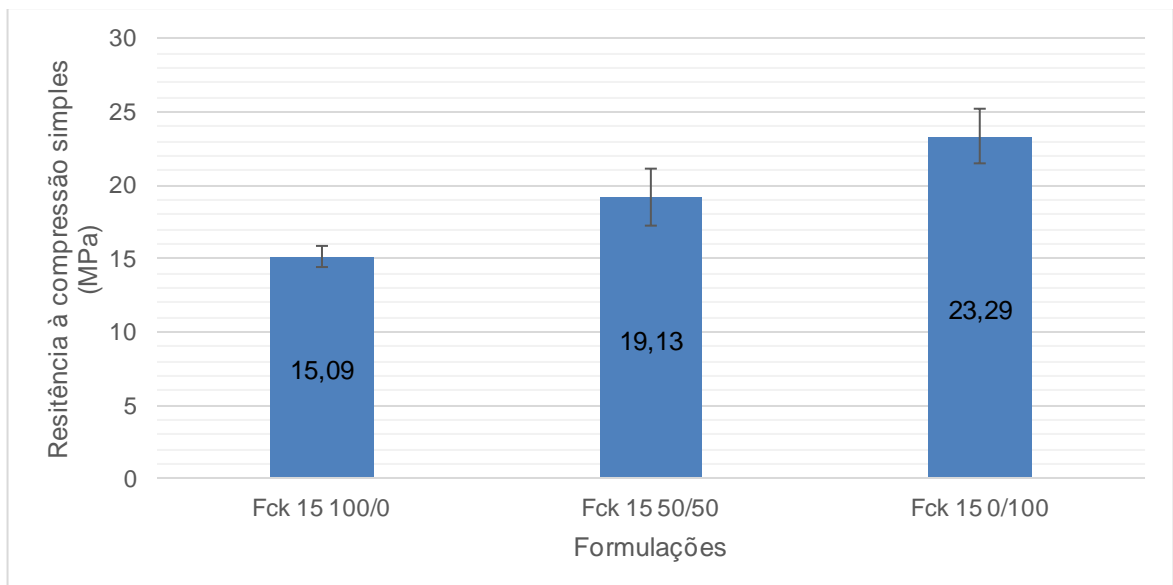


Fonte: Autor (2017).

#### 4.8 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os gráficos 11 e 12 apresentam as médias e desvios padrões dos ensaios de resistência à compressão das 6 formulações estudadas.

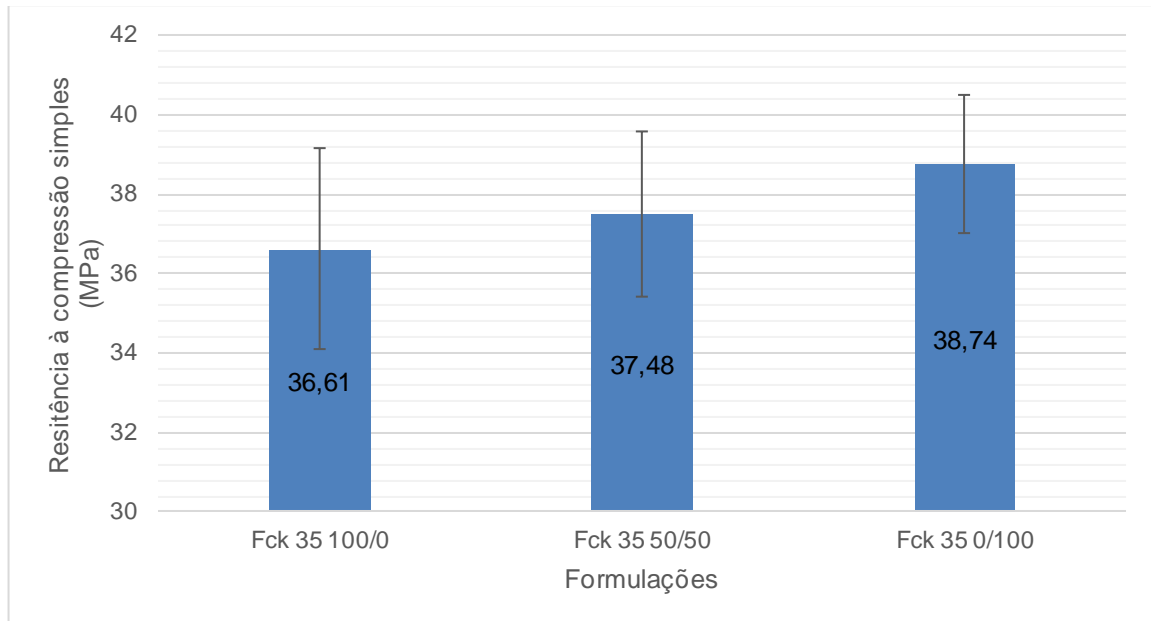
Gráfico 11: Resistência à compressão aos 28 dias – Fck 15 MPa.



Fonte: Autor (2017).



Gráfico 12: Resistência à compressão aos 28 dias – Fck 35 MPa.

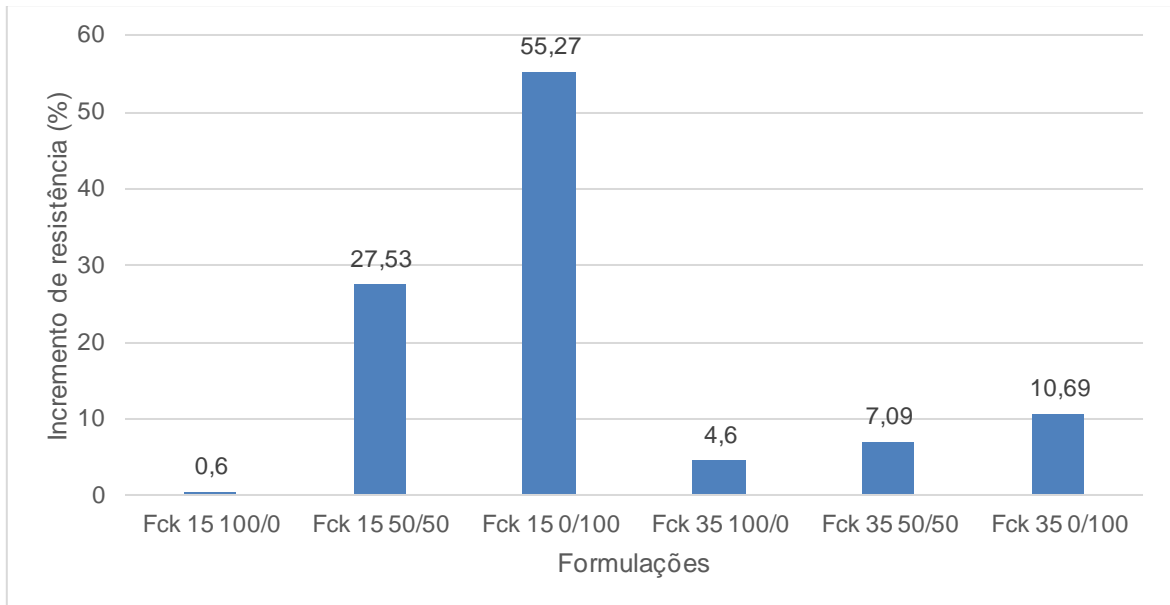


Fonte: Autor (2017).

De acordo com os resultados obtidos, ambos os traços obtiveram ganhos crescentes de resistência conforme a proporção de brita 1 VS/ aumentou. Esse resultado era esperado, pois o aumento da trabalhabilidade obtido pela substituição permitiu uma redução no consumo de água, de modo a manter o abatimento dos traços constante. A diminuição do índice de vazios, que acompanha a redução da relação a/c, é coerente com este aumento observado na resistência.

O incremento, em percentual, que cada formulação obteve pode ser observada no Gráfico 13.

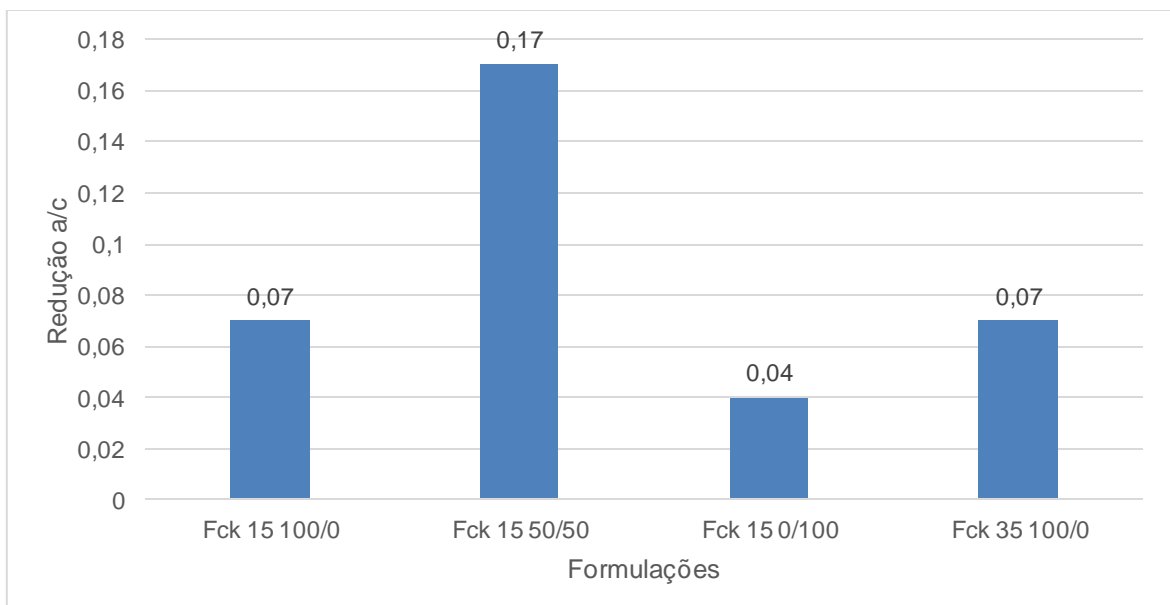
Gráfico 13: Incremento de resistência do concreto.



Fonte: Autor (2017).

Este incremento de resistência é compatível com a redução no consumo de água, apresentada no Gráfico 14.

Gráfico 14: Redução do consumo de água.



Fonte: Autor (2017).

## 5 CONCLUSÃO

A execução deste trabalho permitiu afirmar que a substituição do agregado graúdo por um com menor índice de forma é favorável para o aumento da trabalhabilidade e, conseqüentemente, redução no consumo de água e aumento de resistência.

O ganho é crescente conforme a substituição é maior, como pode-se observar com a formulação de 50/50, que se manteve em patamar intermediário entre a formulação 0/100 e 100/0 para ambos os traços.

É importante ressaltar que o traço de 15 MPa apresentou um incremento de resistência maior com a substituição. Para o concreto com  $F_{ck}$  15 Mpa de resistência, o ganho foi de 27,53% para a formulação 50/50 e de 55,27 % para a 0/100. O concreto com  $F_{ck}$  35 Mpa de resistência apresentou 7,09 % para a formulação 50/50 e 10,69 % na formulação 0/100 no incremento de suas resistências.

Esta diferença significativa pode ser justificada pelo fato de que a maior presença de pasta de cimento no traço de 35 MPa acarretar em um menor impacto na trabalhabilidade ocasionado pela forma do agregado. O traço de 35 MPa possui, para um mesmo volume, 50 % a mais de cimento que o traço de 15 MPa. Para 1 metro cúbico o traço de  $F_{ck}$  15 MPa consome 220 kg de cimento, enquanto o de  $F_{ck}$  35 MPa, consome 330 kg.

Como no traço com mais cimento a influência da forma do agregado na trabalhabilidade foi menor, a redução no consumo de água também foi menor. A menor redução no consumo de água, que no traço de  $F_{ck}$  35 MPa foi de 0,04 e 0,07 para 50 % e 100 % de substituição, justifica o menor ganho de resistência. No concreto de  $F_{ck}$  15 MPa, a redução no consumo de água foi de 0,07 e 0,17 para 50 % e 100 % de substituição.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para a real aplicação deste estudo em uma concreteira, a confirmação destes resultados deve ser feita utilizando caminhões betoneira, estudando se o comportamento em laboratório se reflete em campo.

Uma vez confirmada a relação campo x laboratório, o próximo passo é o estudo da relação custo x benefício, para poder-se afirmar se a substituição do agregado é benéfica ou não para a empresa estudada. Este estudo deve ser feito recalculando os traços, de modo a verificar a redução possível no uso de cimento, e quantificando o custo de beneficiamento do agregado.

Outra abordagem possível é realizar a substituição sem a redução de água, de modo a analisar o impacto da forma diretamente no abatimento do concreto.

A fim de confirmar a relação crescente entre a substituição do agregado com o incremento de resistência, a análise deve ser expandida de modo a incluir as proporções de 25/75 e 75/25.

Utilizar a areia natural e a brita 0 provenientes da britagem do VSI, que consequentemente também terão seu índice de forma reduzido, é uma abordagem possível para a expansão deste estudo.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=357453>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=767>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=317027>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=40092>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=711>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=52163>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=86085>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=3061>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=3065>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=55819>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2979>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM. **Manual do concreto dosado em central**. 1. ed. São Paulo. ABESC, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Ensaio de agregados, concreto fresco e concreto endurecido MT 6**. 1. ed. São Paulo. ABCP, 2000.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção – Normas, Especificações, Aplicações e Ensaio de Laboratório**. 1. ed. São Paulo. Pini, 2012.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção – Novos Materiais para Construção Civil**. 5. ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. Pini, 1994.

METSO MINERALS. **Manual de Britagem**. 6ª Edição. Sorocaba, 2005.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2ª Ed. rev. atual. São Paulo. Pini, 1997.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2ª Ed. São Paulo. Bookman. 2013.

ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades da argamassa**. 2011. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM. **Manual do Concreto Dosado e Central**. Disponível em <<http://www.abesc.org.br/assets/files/manual-cdc.pdf>>. Acesso em 17 mai. 2017.

HJ CRUSHER. Britadores. **Hj Cruher**. Disponível em: <<http://www.hjcrusher.com.pt/product.html>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

MARCONDES, C. G., Brita lamelar x Qualidade do concreto. 12/02/2009. **Massa Cinzenta**. Disponível em <<http://www.cimentoitambe.com.br/brita-lamelar-x-qualidade-do-concreto/>>. Acesso em 17 abr. 2017.

MAYOR, A. V. y, Concreto usinado: Indicações e vantagens. Sem data. **AECweb**. Disponível em: <[https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/concreto-usinado-indicacoes-e-vantagens\\_13734\\_10\\_0](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/concreto-usinado-indicacoes-e-vantagens_13734_10_0)>. Acesso em: 17 abr. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS. **Produto 22 – Agregados para construção civil**. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22\\_RT30\\_Perfil\\_de\\_brita\\_para\\_construcao\\_civil.pdf/01c75ac7-ecd2-4d85-a127-3ecddec2a3](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf/01c75ac7-ecd2-4d85-a127-3ecddec2a3)>. Acesso em 05 jun. 2017.